



**HAL**  
open science

## OPERATION ANTARES: Flux de matière dans l' Océan Austral

- Programme Flux Océaniques

► **To cite this version:**

- Programme Flux Océaniques. OPERATION ANTARES: Flux de matière dans l' Océan Austral.  
[Rapport de recherche] CNRS. 1989, 23p. hal-02103735

**HAL Id: hal-02103735**

**<https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-02103735>**

Submitted on 18 Apr 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

RP 246 (3)

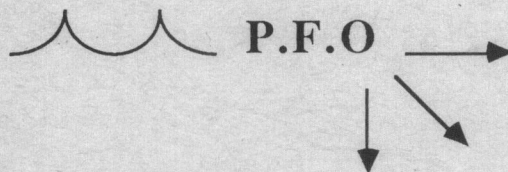
# Programme Flux Océaniques



## OPERATION ANTARES

Flux de matière dans l' Océan Austral

TOE



Rapport N° 3

Opération

Mars 1989

11 AOUT 1989

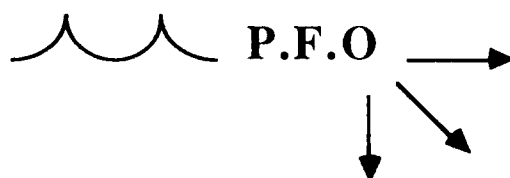
DB 111569

# Programme Flux Océaniques



## OPERATION ANTARES

Flux de matière dans l' Océan Austral



Rapport N° 3

Opération

*Mars 1989*

## **Programme Flux Océaniques**

Responsable exécutif	Guy JACQUES* Laboratoire Arago, Banyuls-sur-Mer
Président du Comité Scientifique	Jean-Claude DUPLESSY CFR, Gif-sur-Yvette
Président du Comité Inter-organismes	Roger CHESSELET Directeur-Adjoint de l' INSU

### **Documents PFO**

Rapport n° 1	Journées Production Primaire en milieu oligotrophe 1988, 80 p. (co-édité avec le Groupe Mediproduct)
Rapport n° 2	Opération Eumeli. Flux de matière dans l'Atlantique tropical en régime eutrophe, mésotrophe et oligotrophe 1989, 38 p.
Rapport n° 3	Opération Antares. Flux de matière dans l'Océan Austral 1989, 23 p.
Rapport n° 4	Programme Flux Océaniques. Fondements, objectifs, calendrier, moyens et organisation 1989, 20 p.

\* Ceux qui souhaiteraient recevoir les documents cités et/ou être inscrits sur la liste d'envoi PFO doivent contacter Guy JACQUES au Laboratoire Arago:

Téléphone 68 88 00 40  
Telex 50 50 20  
Telefax 68 88 16 99

## Contexte scientifique et programme de l'opération Antares 1990-1996



Le Programme Flux Océaniques (PFO) a l'ambition de déterminer, à l'échelle de l'océan global, le flux de matière, essentiellement biogénique, qui disparaît de la couche superficielle, se dépose sur les fonds océaniques et, dans son devenir ultime, quitte les cycles biogéochimiques. Les deux premiers sites choisis pour le système purement océanique, la Méditerranée nord-occidentale (Opération Dyfamed), et l'Atlantique tropical nord (Opération Eumeli), permettront de modéliser le transport de matière, en régime oligotrophe et mésotrophe, dans des zones soumises à d'importants apports éoliens et anthropiques, de température élevée et dont le flux énergétique connaissant des variations de faible amplitude. Ces deux systèmes présentent, en outre, le caractère commun d'une limitation de leur production primaire par le flux de sels nutritifs.

L'étude d'un troisième système océanique, l'Océan Austral (Opération Antares), permettra de modéliser la circulation de matière pour des conditions très différentes: limitation de la production par des processus physiques, fort taux de sédimentation, apports éoliens et anthropiques négligeables, basse température, cycle saisonnier marqué. L'Océan Austral constitue un écosystème paradoxal avec une grande richesse de sa couche superficielle en nutriments, mais une production primaire annuelle voisine d'un système oligotrophe. Autre élément de ce paradoxe, la production de silice biogénique dans la couche euphotique, estimée au tiers du total mondial, ne laisse pas présager une si grande richesse des abysses antarctiques qui recueillent les deux tiers du flux mondial de silicium. Si ces traits sont communs à l'ensemble de l'Océan Austral, il faut cependant y distinguer au moins trois sous-systèmes:

- la frontière banquise-eau.
- les eaux originaires de la Divergence Antarctique avec leurs structures tourbillonnaires à mésoéchelle dont la fréquence, en océan ouvert, constitue une originalité
- les zones frontales: Front Polaire et Convergence Antarctique, Convergence Subtropicale, Front Weddell-Scotia.

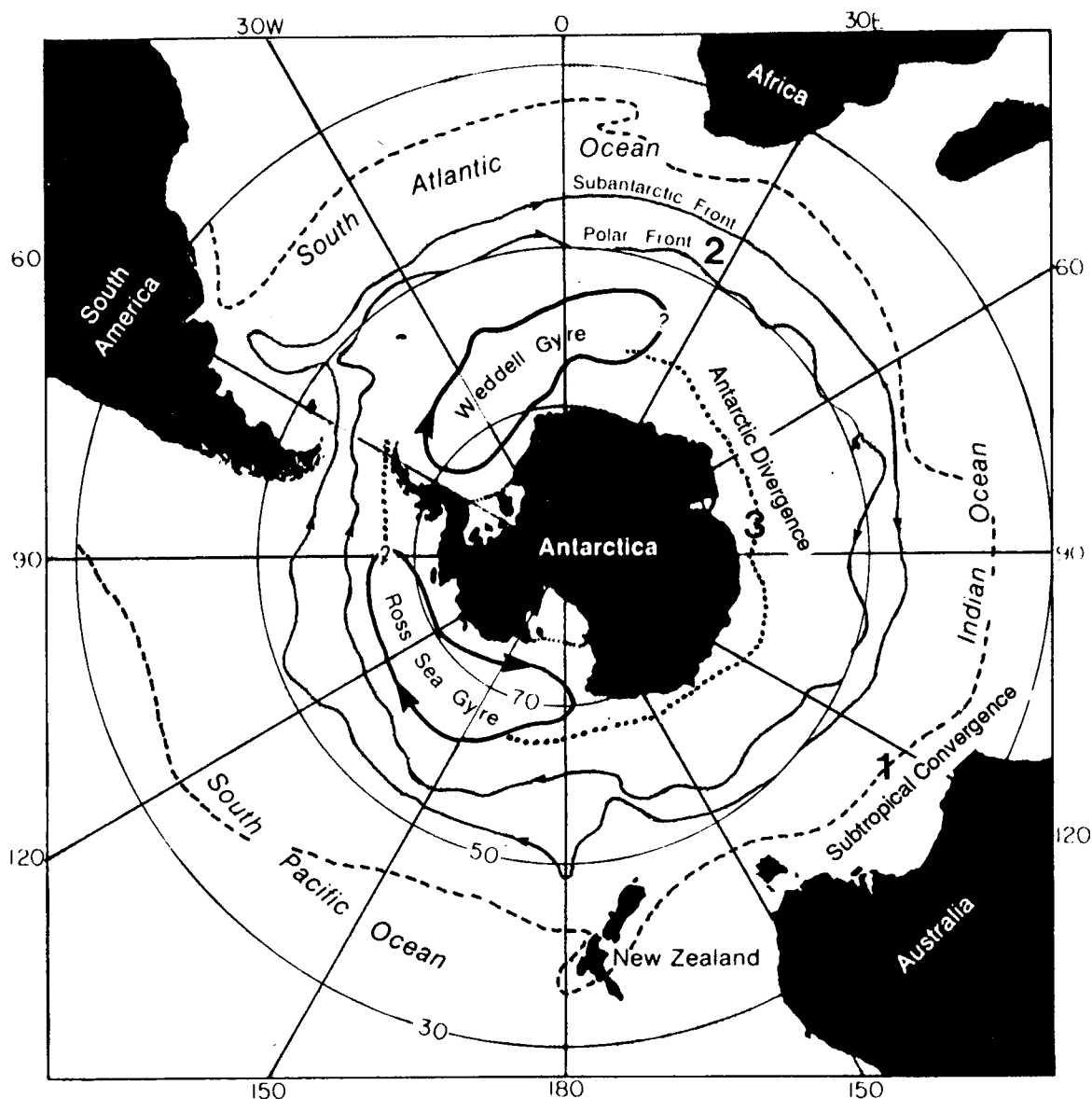
Le programme proposé pour modéliser la production primaire, les flux de matière biogénique (C, N, Si), des métaux-traces et des radioéléments associés qui transitent à travers l'Océan Austral nécessite une stratégie diversifiée: campagnes de navires de haute mer ou de navires polaires à différentes saisons, suivi d'une station permanente proche de Kerguelen, utilisation des données satellitaires, application de modèles. Dans un vaste océan à échanges intenses entre les masses d'eau, situé à l'écart des apports anthropogènes et éoliens directs, cette approche devrait permettre:

- de mesurer les flux entre les principaux compartiments du réseau trophique.
- de prendre en considération la variabilité du système dans le temps.
- d'avoir un suivi synoptique de phénomènes hydrologiques tels que les fronts et tourbillons et de la distribution des particules pigmentées de la couche superficielle qui en dépend étroitement.

### A - Insertion d' Antares dans les programmes nationaux et internationaux

Antares constituera l'étape ultime de la première phase du "Programme Flux Océaniques". Avec Dyfamed, Antares présente le trait commun d'étudier un système caractérisé par la rapidité du renouvellement des masses d'eaux et l'importance de l'advection (verticale et horizontale). Antares prend en compte le modèle de transport de matière expérimenté pour Dyfamed et Eumeli. Comme cette dernière opération, Antares est avant tout une étude de processus: forçage

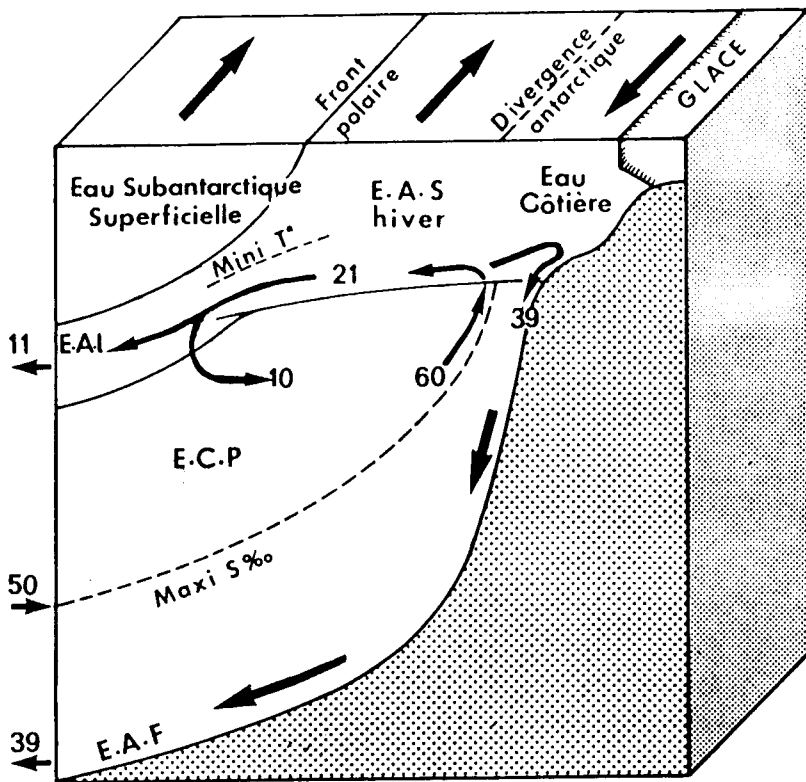
de la production primaire par les phénomènes physiques, couplage des cycles biologiques basés sur la production nouvelle et la production régénérée, découplage des cycles du carbone et du silicium. Antares bénéficiera de l'expérience acquise antérieurement par PFO dans le domaine méthodologique, notamment pour la collecte des particules à l'aide de pièges, et leur conservation. Par l'originalité du système étudié (faible rôle des apports éoliens et anthropiques; limitation de la production primaire par les facteurs physiques ou/et les micronutriments) Antares complète la gamme de systèmes pris en compte par les programmes s'intéressant aux flux océaniques.



**Fig. 1 Fronts superficiels et limites de l'Océan Austral**

- 1 = Convergence Sub Tropicale
- 2 = Zone du Front Polaire (ZFP). Elle comprend le Front Polaire (FP) proprement dit marqué par la disparition au-delà de 200 m du minimum thermique de l'eau d'hiver et le Front Sub Antarctique(FSA) caractérisé par un gradient thermique de surface.
- 3 = Divergence Antarctique

L'Océan Austral, délimité par le continent antarctique et la Convergence Sub Tropicale couvre 76 millions de km<sup>2</sup> soit 21% de l'océan mondial. L'Océan Antarctique proprement dit, d'une surface de 38 millions de km<sup>2</sup>, se situe au sud du Front Polaire.



**Fig. 2 Principales masses d'eau de l'Océan Austral et leur circulation**

EAS : Eau Antarctique Superficielle  
 EAI : Eau Antarctique Intermédiaire  
 ECP : Eau Circumpolaire Profonde  
 EAF : Eau Antarctique de Fond

Les valeurs en regard des flèches représentent les débits méridionaux en millions de  $m^3 \cdot s^{-1}$ .

Il importe également de souligner la continuité d'Antares avec les programmes antérieurs menés dans le secteur indien, avec le soutien actif des Terres Australes et Antarctiques Françaises: programmes Antiprod, Fibex et Sibex (parties intégrantes du programme international Biomass), Apsara et Indigo. Ces programmes, déjà ouverts sur une coopération internationale, constituent une base scientifique sérieuse de connaissance sur le fonctionnement du système austral.

Le chantier austral du Programme Joint Global Ocean Flux Study constitue seulement une perspective, mais plusieurs organismes mentionnent leur intention de donner un prolongement aux chantiers Atlantique et Pacifique. La réflexion conduite autour d'Antares placera la France en position privilégiée pour coopérer à l'élaboration d'un volet austral à JGOFS. Dès maintenant, le Programme Epos (European Polarstern Study), mis en oeuvre dès 1988 par douze nations dans le cadre du Réseau Polaire Européen (Fondation Européenne pour la Science), revendique explicitement la parenté de ses objectifs avec JGOFS pour lequel il constitue un excellent champ d'expérience. La contribution française, axée sur les mécanismes de contrôle des flux de carbone et de silicium dans la couche superficielle de l'Océan Austral, représente une opportunité unique de travail dans la zone marginale de la banquise en Mer de Weddell et en Mer du Scotia. Elle constitue, en fait, la première étape d'Antares.

Antares aura également des liens scientifiques (cycle du carbone) et logistiques avec WOCE-France qui se déroulera dans le secteur indien de l'Océan Austral, à l'époque de l'opération pilote d'Antares. WOCE-France, consacré au courant circumpolaire antarctique, prévoit de réaliser:

- deux sections hydrologiques méridiennes de Madagascar à l'Antarctide.
- une surveillance de la région Kerguelen - Amsterdam: courantométrie, marégraphie, hydrologie.

- un suivi de surface par altimétrie et diffusiométrie satellitaires: topographie, dynamique, champ de vent.

D'autre part, pour WOCE, les chercheurs anglais développent un modèle de circulation antarctique (modèle FRAM) particulièrement adapté à l'étude des zones frontales où pourront être évalués la couche de mélange, la diffusion verticale et le transport d'eau.

## **B - Objectifs d'Antares**

L'objectif d'Antares est la modélisation de la production primaire et des flux de matière biogénique qui transitent à travers l'Océan Austral (Fig. 3), prototype des systèmes à fort taux de renouvellement, situé à l'écart des apports anthropogéniques et éoliens directs. Tenant compte des connaissances actuelles, et en fonction des moyens prévisibles, nous avons choisi de traiter en priorité la modélisation des flux de carbone, de silicium ainsi que celui de l'azote. A son terme, le programme Antares permettra de procéder à une réévaluation du bilan de ces éléments pour l'ensemble de l'Océan Austral.

### **1 - Problématique générale**

Les flux de matière transitant dans l'Océan Austral seront étudiés pour un système simplifié à trois compartiments (Fig. 3): la "couche euphotique", siège de la photosynthèse et d'une partie du recyclage, la "couche profonde" et " l'interface eau-sédiment", sites de la régénération). Modéliser les flux non conservatifs c'est, dans chacune des boîtes, résoudre des équations du type:

*pour la matière dissoute* (concentration = c):

$$dc/dt = - \text{advection} + \text{diffusion} + \text{recyclage} - \text{consommation} - \text{scavenging}$$

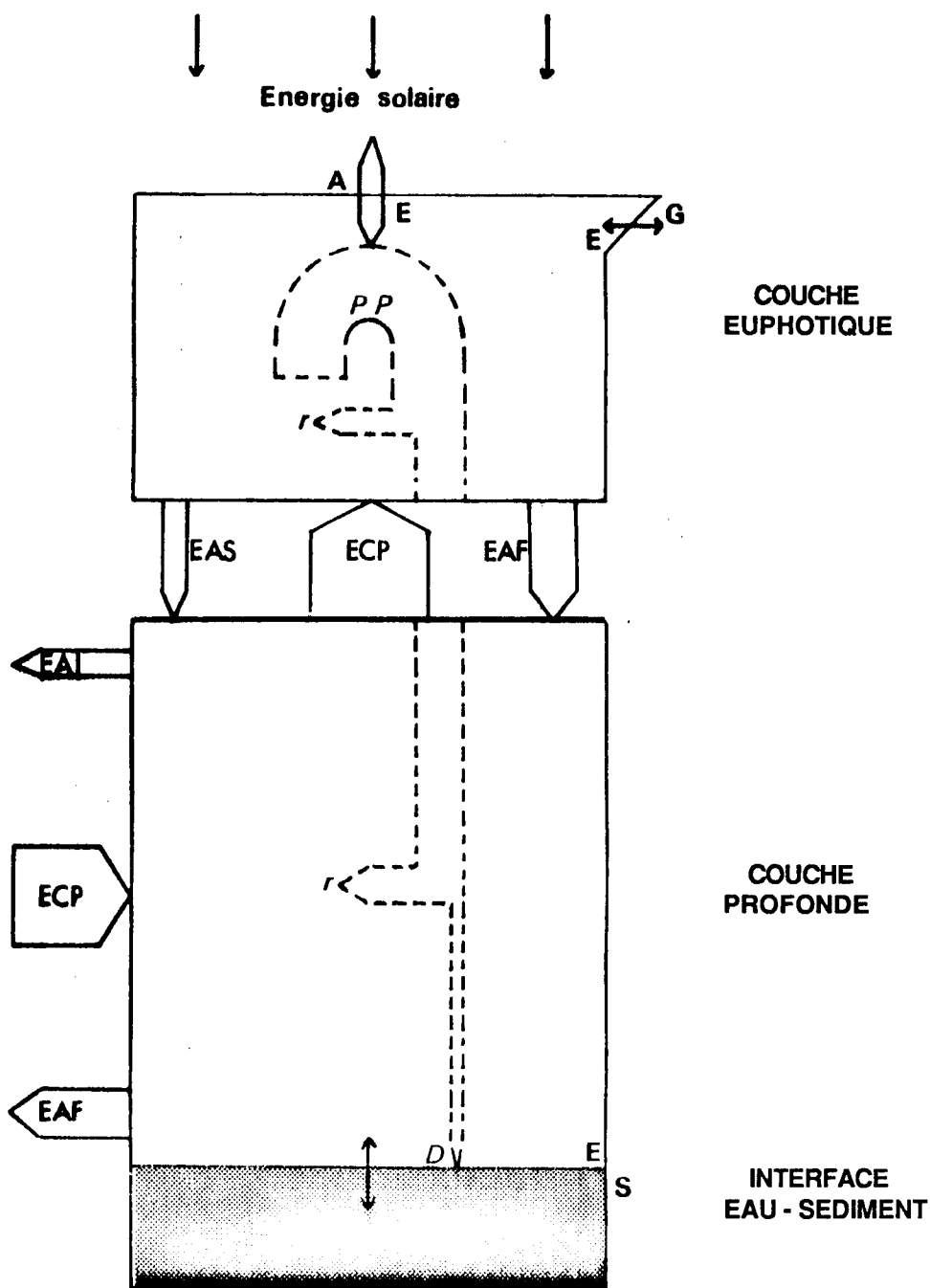
*pour la matière particulaire* (concentration C):

$$dC/dt = - \text{advection} + \text{diffusion} + \text{consommation des formes chimiques dissoutes} + \text{sédimentation} + \text{scavenging}$$

Ceci implique de connaître les conditions initiales et les limites aux interfaces, ce qui constitue le but des campagnes à la mer et de déterminer les flux d'advection et de diffusion. Ce dernier aspect sera abordé par suivi de flotteurs indiquant le déplacement horizontal des masses d'eaux, ce qui permet, indirectement, de considérer les transports verticaux. La modélisation s'appuiera sur trois types de données:

- des mesures directes, soit à partir des techniques "classiques" (bilan de sels nutritifs, méthodes isotopiques), soit à partir d'une approche plus moderne: pièges à particules, spectres pigmentaires, marqueurs biochimiques, traceurs.
- l'acquisition expérimentale des coefficients caractéristiques des processus majeurs des différents compartiments trophiques.
- des mesures effectuées à partir de satellites qui fournissent des données presque quotidiennes, d'où une observation fine de la variabilité de surface. Les données utiles à une meilleure paramétrisation des flux de matière produits en surface sont la température, la vitesse du vent et la couleur de la mer. La température de surface est déjà déterminée systématiquement par la NOAA sur des périodes de quinze jours à partir des mesures, dans l'infrarouge, des satellites Tiros. Ces trois paramètres, température, champ de vent et couleur de la mer seront mesurés simultanément par ERS 1 dont le lancement est prévu en 1991. La couleur de la mer pourrait être également mesurée par un instrument embarqué à bord de Landsat 6 à la même époque. Cependant, la détermination de la température par infrarouge et de la couleur de la mer sont impossibles sous une couverture nuageuse importante, ce qui est fréquent dans l'Océan Austral. Il faut donc demeurer modérément optimiste sur les promesses des satellites.





**Fig. 3** Circulation de la matière biologique dans l'Océan Austral (schéma établi pour le silicium)

Le système, à l'abri des influences anthropiques est alimenté en matériel organique par la production primaire (*PP*) consommée par les organismes et recyclé (*r*) dans les eaux superficielles et profondes en proportions variables selon l'élément considéré, le carbone et la silice ayant des comportements très différents. Une partie quitte le cycle de pleine eau pour se déposer (*D*) dans les abysses.

L'importance des flux d'importation par l'Eau Circumpolaire Profonde (*ECP*) et d'exportation par l'Eau Antarctique de Fond (*EAF*) et l'Eau Antarctique Intermédiaire (*EAI*) nécessite la prise en compte de l'advection.

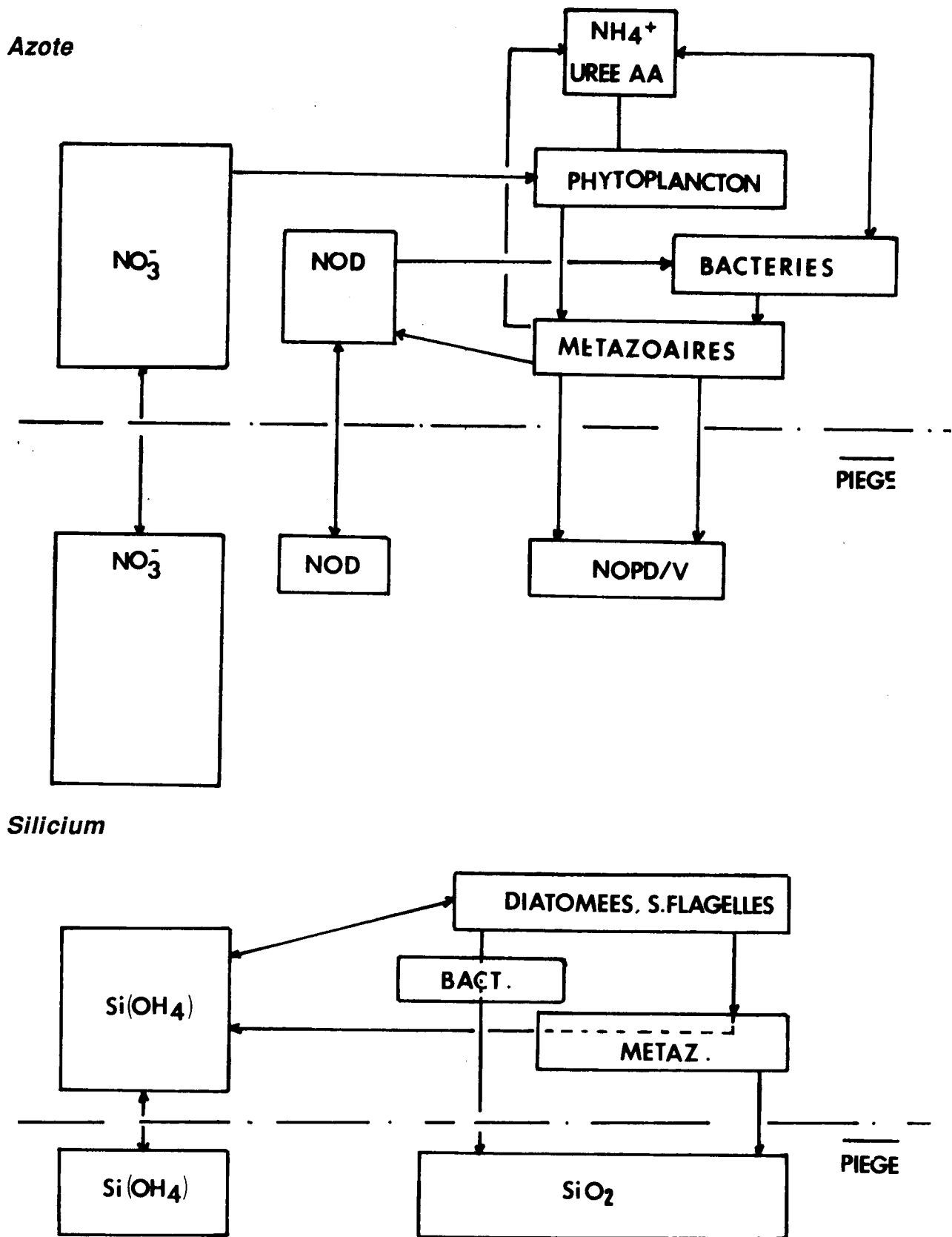


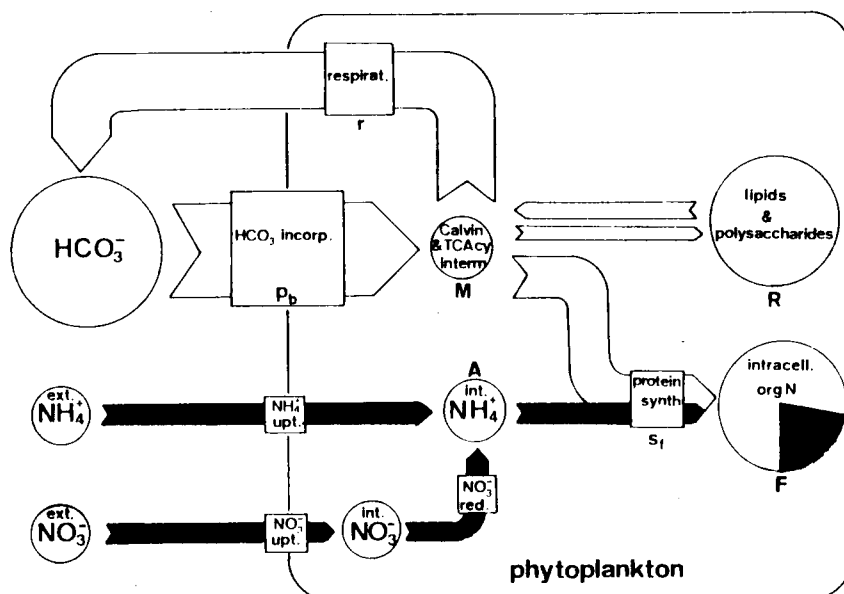
Fig. 4 Modélisation des flux d'azote et de silicium dans la colonne d'eau de l'Océan Austral  
 La ligne tiretée sépare la "couche euphotique" de la "couche profonde".

## 2 - Modélisation des flux dans la couche euphotique

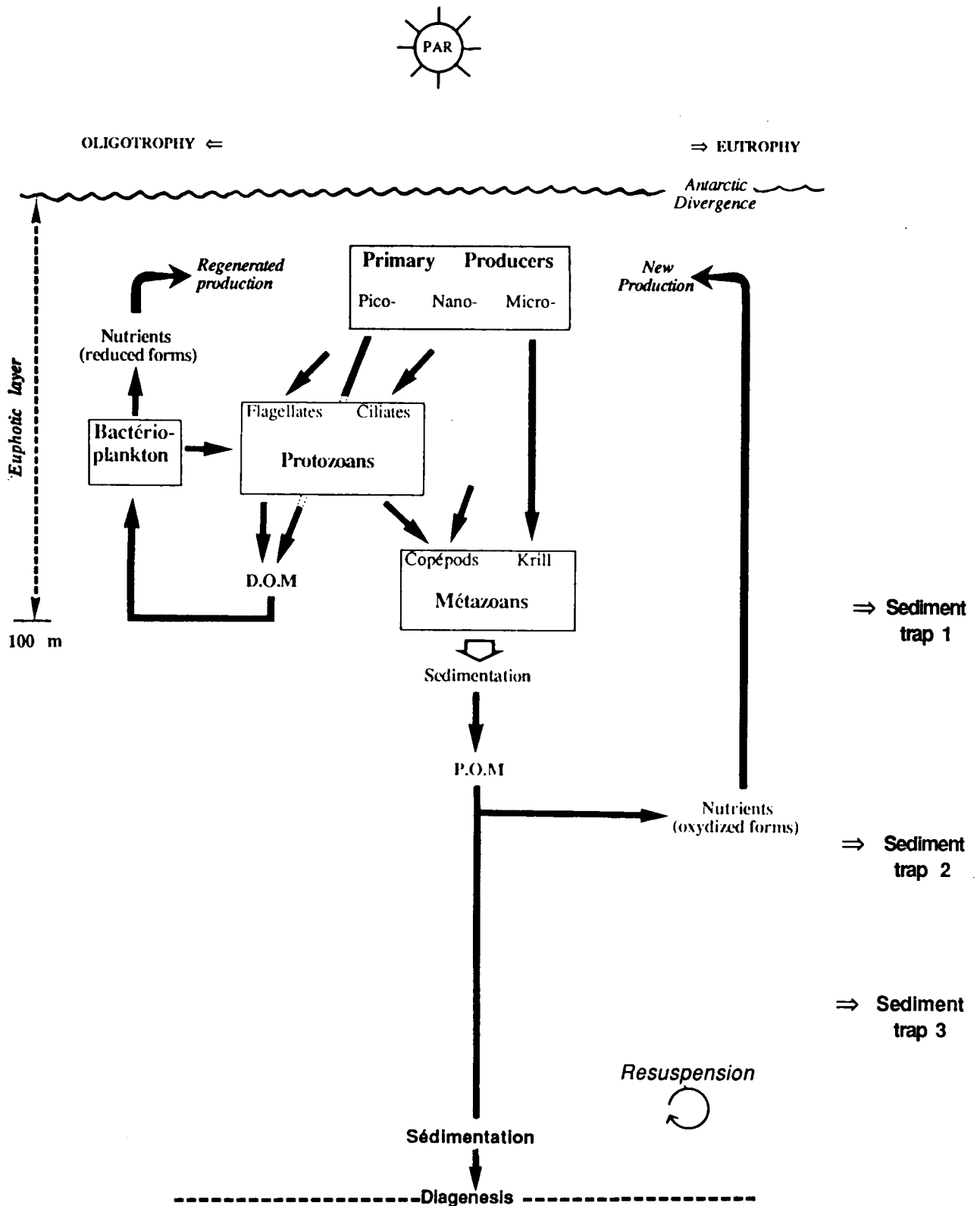
Deux priorités sont retenues pour modéliser les flux de carbone, de silicium et d'azote dans la couche euphotique (Fig. 4): la détermination de la production biogénique proprement dite et l'étude du couplage entre les cycles basés sur les particules de grande taille (cycle "macro" classique) et sur les catégories de taille les plus petites (cycle "micro": flagellés autotrophes, ciliés etc....).

### Production primaire

Deux difficultés sont à résoudre quant à la modélisation de la production primaire en système antarctique. D'abord l'inadaptation du concept profondeur de mélange - profondeur critique, ensuite l'incertitude qui reste à lever sur l'absence de tout facteur chimique limitant (rôle des micro-nutriments). La modélisation des flux au premier niveau trophique s'appuie sur un modèle "physiologique" (Fig. 5) qui donne des résultats prometteurs dans l'Océan Austral. La production primaire peut être prédite si l'on connaît, pour des situations écologiques définies, les facteurs qui définissent la production: coefficients de la courbe lumière-photosynthèse et taux de croissance, tous déterminés par le taux d'incorporation du carbone radioactif dans les différents compartiments métaboliques. Ce modèle est contrôlé par l'éclairement, la température et le vent (couche de mélange). Il sera appliqué pour le système de la zone marginale de la glace et pour le système turbulent homogène des eaux antarctiques du large. Le système frontal est, pour l'instant, moins bien compris. Aussi, dans une première étape, se limitera-t-on à décrire des phénomènes: relations entre les stocks des différents compartiments, liaison avec les structures hydrologiques notamment à mésoéchelle, variabilité des flux. Le modèle de base sera établi après la campagne préliminaire sur le système frontal.



**Fig. 5** Modèle de croissance du phytoplancton basé sur les constituants cellulaires et les activités métaboliques du phytoplancton  
La résolution du modèle implique la mesure des paramètres des courbes lumière-photosynthèse ainsi que des taux d'incorporation du carbone dans différents substrats cellulaires fonctionnels ou de réserve  
(D'après Lancelot *et al.*, 1988)



**Fig. 6 Deux réseaux de circulation du flux organique dans l' Océan Austral**

- une partie variable du flux circule suivant un réseau classique à base de particules de grande taille (partie droite du schéma). Fondé essentiellement sur la production nouvelle, ce flux est à la base de l'exportation de matériel particulaire vers les eaux profondes et le sédiment.
- en dérivation, apparaît une "boucle microbienne" insuffisamment connue, à base d'organismes et de particules de très petite taille (partie gauche du schéma). Sédimentant très lentement et recyclé avant 200 m, ce flux joue probablement un rôle négligeable dans le transfert en profondeur.

### **Couplage cycles "micro" et "macro"**

Les flux de matière circulant à travers le cycle "macro", basé sur la production nouvelle et "micro", basé sur la production recyclée (Fig. 6) seront évalués en utilisant un modèle proche de celui proposé par la Station de Villefranche (expérimenté pendant Dyfamed puis Eumeli), modèle qui sera couplé au précédent consacré à la seule production primaire. Nous utiliserons un réseau simplifié composé de :

- quatre macro-nutriments: ammonium, nitrates, phosphates, silicates et, éventuellement, un à deux micro-nutriments (métaux).
- la matière organique dissoute globale.
- la matière organique particulaire globale et par classes de taille.
- trois classes de phytoplancton: micro- (> 10  $\mu\text{m}$ ), nano- (de 3 à 10  $\mu\text{m}$ ) et pico- (< 1  $\mu\text{m}$ ).
- le bactérioplancton
- trois classes d'herbivores : copépodes, krill et salpes.
- les carnivores.

### **3 - Modélisation des flux dans les eaux profondes**

Le modèle ci-dessus sera utilisé. Il se simplifie cependant puisque les seuls flux mis en jeu sont, pour la matière particulaire, ceux de la sédimentation, du recyclage et du scavenging.

Les flux verticaux mis en jeu dans la colonne d'eau seront mesurés à l'aide des variations de stocks et des pièges à particules situés à trois niveaux: la base de la couche euphotique, le niveau de l'Eau Circumpolaire Profonde (soit, environ, 2000 m) et l'Eau Antarctique de Fond (pratiquement juste au-dessus de la couche néphéloïde) (Fig. 6).

L'évaluation des transports advectifs verticaux suppose la mesure des courants dans les principales masses d'eau (par exemple, au niveau des pièges à particules): Eau Antarctique d'Hiver, Eau Antarctique Intermédiaire, Eau Circumpolaire Profonde et Eau Antarctique de Fond.

### **4- Modélisation des flux à l'interface eau-sédiment**

Afin de comprendre et modéliser l'activité benthique et la diagenèse précoce, il est nécessaire de déterminer les flux de matières dissoutes et particulaires de part et d'autre de l'interface eau-sédiment. Les flux de matière dissoutes sont mesurables dans les environnements de faible énergie hydraulique à partir des flux diffusifs (gradients de concentration au voisinage de l'interface) ou des variations de concentration dans un volume d'eau surnageante enfermée au-dessus d'une surface connue. Les vitesses de sédimentation peuvent être estimées à l'aide de radioéléments ( $^{234}\text{Th}$ ,  $^{228}\text{Th}$ ,  $^{224}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ ) permettant de prendre en compte les échelles saisonnières et annuelles.

L'ensemble de ces déterminations implique la mise en oeuvre de pièges à particules, de carottiers et de chambres expérimentales benthiques.

### **C - Choix des sites**

La zone travail d'Antares a été choisie en fonction des critères suivants :

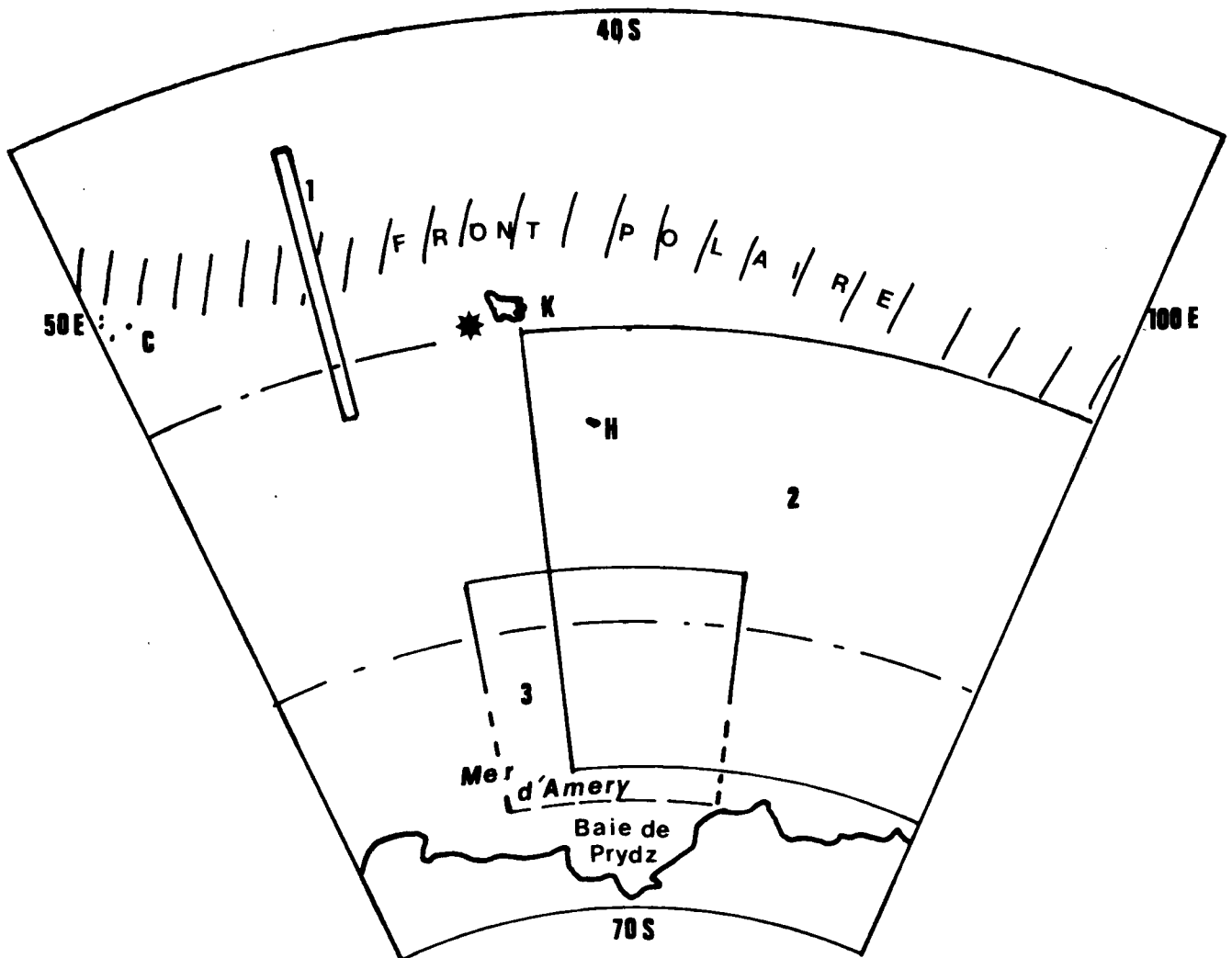
- réunir les trois principaux sous-systèmes:
  - eaux du large influencées par la Divergence Antarctique et ses tourbillons.
  - zone marginale de la glace.
  - zones frontales.

Le choix des fronts, zones à gradients physiques, chimiques et biologiques très accusés est justifié par leur impact sur le bilan global d'un bassin océanique. On ne peut concevoir un tel bilan sans tenir compte de ces singularités régionales, physiquement très dynamiques et qui constituent des lieux de forte production. Leur effet sur les flux biogéochimiques est d'autant plus marqué que nombre

d'autres raisons (convergence des eaux, caractère impulsif de la production) agissent de telle façon qu'une fraction plus importante qu'ailleurs du flux produit en surface gagne les eaux profondes et le sédiment.

- bénéficier d'un bon volant de connaissances en matière de circulation et du fonctionnement de l'écosystème pélagique.
- faciliter la liaison avec le programme WOCE-France.
- se situer dans la zone de travail habituelle du *Marion Dufresne*.

La zone choisie, située dans le triangle Crozet-Kerguelen-Baie de Prydz (Fig. 7), répond à l'ensemble de ces critères:



**Fig. 7 Les zones de travail de l'opération Antares**  
(Secteur indien de l'Océan Austral. Bassin de Weddell-Enderby. Plateau des Kerguelen. Mer d'Amery. Baie de Prydz)  
C = Crozet; H = Heard. K = Kerguelen

\* Station permanente Antarfix (mouillage de pièges et courantomètres)

1 = Système frontal

2 = Système antarctique du large - tourbillon

3 = Système de la Zone Marginale de la Glace

- le site n° 1 correspond à l'intersection de la zone frontale Convergence Sub Tropicale - Front Polaire par l'une des sections de WOCE (60° E). L'étude de cette zone frontale nécessite les techniques satellitaires, ce qui repousse l'action à la fin de la période d'étude. Cependant, pour jeter les bases d'une modélisation, une opération préliminaire est indispensable dès 1991, avec un soutien des océanographes physiciens du LODYC. Pendant la phase opérationnelle, un réseau de trois mouillages sera déployé pendant quatre années successives.
- le site n° 2 correspond au système antarctique du large - tourbillons: il bénéficie d'une bonne base de connaissances quant à son fonctionnement en régime estival (programmes Antiprod/Apsara). Les progrès attendus viendront, d'une part, de la mise en oeuvre de techniques nouvelles (chimie ultra-propre; pièges à particules; différentes méthodes de mesure de production de matériel biogénique) et, d'autre part, de la prise en compte de l'effet sur les flux des eaux de surface des tourbillons mésoéchelle (amplitude 80 km, période 1 mois), engendrées par le Plateau des Kerguelen. Un réseau de trois mouillages de pièges à sédiments sera déployé dans cette zone: l'un sur fonds de 5 000 m à l'ouest du Plateau des Kerguelen, les deux autres dans la zone de circulation perturbée par le Plateau sur fonds de 2 000 à 4 000 m.
- le site n° 3 correspond au sillage de fonte de la banquise lors de son retrait saisonnier (quelques centaines de kilomètres de large) dont l'importance sur le budget global de carbone et de silicium de l'Océan Austral a été mise en évidence par les équipes américaines en Mer de Ross, et, dans une moindre mesure, en Mer de Weddell. Cette étude bénéficiera du savoir-faire acquis par deux équipes de l'opération Antares durant la campagne européenne Epos. L'utilisation du nouveau navire polaire français *L'Astrolabe*, associée à celle du *Marion Dufresne* permettra de réaliser, dès 1993, une étude complète de ce sous-système essentiel de l'Océan Austral; un élargissement d'Antares à l'échelle européenne, déjà entrepris, pourrait aussi conduire à une campagne à plusieurs navires européens.

#### D - Variabilité temporelle

Pour aboutir à une connaissance quantitative des flux verticaux de transfert de matière au sein de l'Océan Austral, il faut, en dépit des difficultés logistiques inhérentes à cette région du globe, prendre en compte la variabilité temporelle. Nous disposerons pour cela de trois approches:

- la réalisation de quelques campagnes saisonnières (Chap. 4).
- le mouillage de pièges plusieurs mois durant dans deux des trois systèmes: les eaux du large et le système frontal, seule la zone marginale de la banquise étant exclue de cette approche.
- la mise en place d'une station fixe au large des Iles Kerguelen ("Antarfix") (encart suivant).
- l'utilisation de la télédétection. La mesure en continu des paramètres grâce à la centrale d'acquisition mouillée à cette station fixe permettra de calibrer et de valider les mesures spatiales, tandis que ces dernières élargiront le cadre des valeurs obtenues à la station.

---

## La Station fixe de Kerguelen (ANTARFIX) et le mouillage de pièges à particules

A partir de 1989, un navire océanographique affrété et géré par les TAAF, *La Curieuse*, sera basé à Kerguelen. C'est là une opportunité remarquable pour aborder la variabilité temporelle de la biogéochimie d'un des systèmes de l'Océan Austral. En effet, ce bateau permettra de suivre une station fixe de prélèvement d'échantillons dissous et particulaires dans les parages de cette île, située vers 49.7 °S et 70 °E. Il est prévu de disposer, dès 1990, d'un mouillage de deux trappes à sédiments: l'une située sous la couche euphotique et la seconde au sein de l'Eau Circumpolaire Profonde, afin d'évaluer les fluctuations saisonnières du flux de particules sur un minimum de trois ans (ce projet est complémentaire de celui sur les échanges gazeux à l'interface air-mer proposé par Mr Poisson et Mme Lambert). Les prélèvements réguliers d'échantillons pour la mesure de paramètres dissous seront effectués sur le site par *La Curieuse*.

### 1 - Problématique

Nous disposons actuellement d'un certain nombre de méthodes de paramétrisation des processus de transfert verticaux qui reposent sur l'acquisition de données physiques, chimiques et biologiques en un nombre fini de points de l'océan. Une station permanente présente l'intérêt de mettre en oeuvre des mesures de flux dissous et particulaires et de fournir un suivi "quasi-continu" dans le temps des variations de ces flux. L'existence de la base de Kerguelen, du navire *La Curieuse* et des rotations régulières du *Marion Dufresne* offrent l'opportunité rare d'une implantation de ce type de station dans l'Océan Austral.

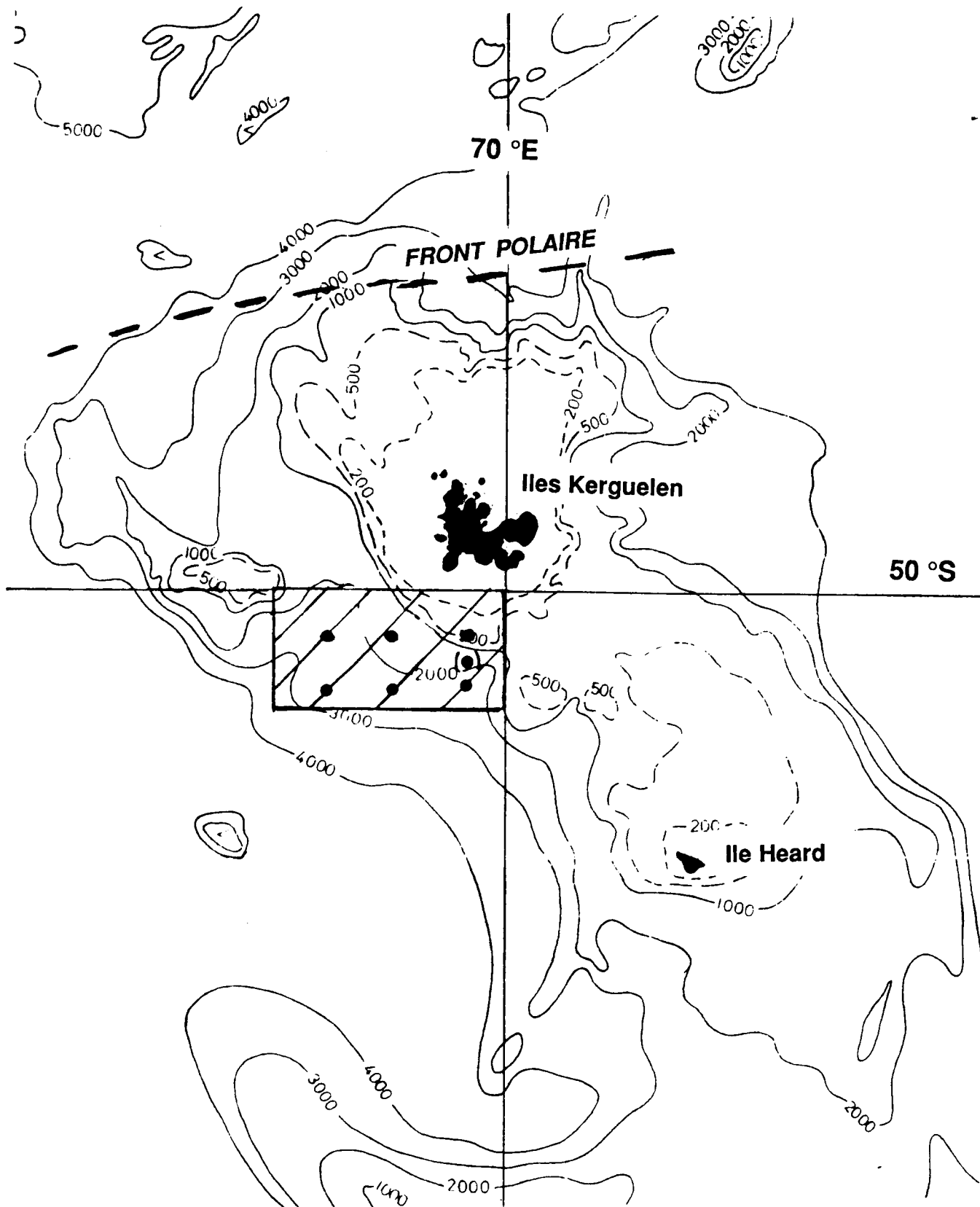
#### La variabilité saisonnière des flux de matière; ses causes

Jusqu'à présent, peu de données de flux ont été recueillies en continu et sur très peu de sites. On citera seulement les suivis réalisés à la station S de la Mer des Sargasses et à la Station P dans le Bassin de Panama. Ces suivis, effectués sur plusieurs années ont montré la variabilité saisonnière élevée des flux de matière, pouvant atteindre un facteur six, même dans l'environnement oligotrophe de la Mer des Sargasses. Malheureusement, les stations de ce type sont trop peu nombreuses pour permettre d'extrapoler ces acquis à l'ensemble de l'océan mondial.

De plus, aucune n'est située dans un environnement représentatif des zones polaires. Or, l'Océan Austral est une entité océanique d'une surface importante (360 millions de km<sup>2</sup>, soit 20% de la surface de l'océan mondial) relativement homogène et représentatif de systèmes oligotrophes de hautes latitudes. Sa variabilité saisonnière est virtuellement inconnue. La mise en place d'une station fixe permettra donc de documenter pour la région voisine du Front Polaire, cette variabilité qui est susceptible de déterminer le budget mondial de la silice, et d'agir significativement sur celui des autres éléments nutritifs (nitrates, phosphates) et, finalement, sur le cycle du carbone et du gaz carbonique.

Les apports externes, la température, la lumière, l'alimentation de la surface en sels nutritifs ainsi que les paramètres agissant sur le rapport entre les épaisseurs de la couche de mélange et de la couche euphotique (vitesse du vent, vagues...) influencent la production primaire et la nouvelle production et donc la quantité de matière quittant la surface de l'océan. Or, vis à vis de ces paramètres, l'Océan Austral présente des caractéristiques marquées:





**Fig. 8** Région océanique retenue pour la mise en place de la station permanente Antarfix  
 La campagne préparatoire de 1990 réalisera, dans la zone hachurée, un relevé bathymétrique ainsi que des mesures physiques et chimiques sur le matériel particulaire et dissous aux stations repérées par un point noir.

- c'est une région du globe éloignée de toute influence continentale et anthropique. On estime que le flux de poussières atteignant l'interface air-mer est au moins dix fois plus faible que celui observé dans le Pacifique Central et jusqu'à six cents fois moindre que celui qui caractérise l'Atlantique Nord tropical. La pollution atmosphérique y est, elle aussi, très basse: de dix à deux cents fois inférieure à celle mesurée dans l'Atlantique Nord. On peut donc considérer l'Océan Austral, et donc le site retenu pour la station fixe (Fig. 8) comme exempt d'apports atmosphériques et continentaux, à la différence, en particulier, des sites Dyfamed et Eumeli.
- les vents y soufflent violemment, présentant des vitesses supérieures à 11 m. s<sup>-1</sup> environ deux cents jours par an, ce qui agit sur l'épaisseur de la couche de mélange et sur l'échange des gaz à l'interface air-mer. Or, généralement, épaisseur de la couche de mélange et production primaire présentent une corrélation négative nette.
- la teneur en sels nutritifs des eaux de surface y est élevée, mais varie avec la saison et la position géographique, avec, en particulier, un gradient méridien de silice au sud du Front Polaire. Cette variabilité affecte probablement la productivité primaire dans la région retenue pour le site d'échantillonnage.

Pour l'ensemble de ces paramètres, la présence d'une station fixe dans la région de Kerguelen permettra de découpler les facteurs "temporels" de ceux liés à la géographie, qui eux-mêmes seront étudiés au cours des campagnes de l'ensemble du programme Antares.

#### **Bases biologiques et géochimiques de la reconstitution des paléo-environnements**

Les travaux réalisés lors du programme Apsara ont montré que l'Océan Austral avait été l'objet de fluctuations marquées au cours du dernier cycle climatique (les 150 000 dernières années). Pour affiner cette reconstitution, il est nécessaire de mieux comprendre les facteurs qui conditionnent la composition des flores de diatomées au cours du cycle saisonnier, la variabilité des associations de foraminifères et les relations entre la composition isotopique des coquilles de foraminifères et celle de l'eau (teneur en O<sub>18</sub> de l'eau de l'eau; teneur en <sup>13</sup>C et en <sup>14</sup>C du gaz carbonique total dissous). Ces relations, indispensables à une reconstitution fiable des paléo-environnements de l'Océan Austral, seront établies en comparant les squelettes de foraminifères et de diatomées recueillis dans les pièges aux facteurs physico-chimiques de l'eau de mer mesurés pendant la période de récolte.

#### **2 - Choix du site**

Le site de mouillage retenu (Fig. 8), se situera dans l'ouest - sud ouest de Kerguelen et servira ainsi de test technique à la tenue des mouillages dans l'environnement hostile de l'Océan Austral. Ce site présente les avantages logistiques et scientifiques suivants:

- il est situé "au vent" de l'île, donc peu perturbé par celle-ci.
- il se trouve à un emplacement où l'étendue du plateau de Kerguelen est faible, ce qui permet d'atteindre des fonds supérieurs à 2000 m à 150 milles de Port-aux-Français, soit, pour *La Curieuse*, des sorties de l'ordre de 35 à 50 heures.
- sa latitude le situe, en permanence, au sud du Front Polaire donc dans l'Océan Austral proprement dit. Cette localisation permettra d'étudier les effets des forçages climatiques indépendamment de variations de la composition chimique des masses d'eaux, ce qui ne serait pas le cas plus au nord.
- enfin, ce site est identique à celui proposé pour l'étude des échanges de gaz (en particulier du CO<sub>2</sub>) entre l'océan et l'atmosphère. Les problèmes soulevés par ce

programme sont couplés aux nôtres, les mesures sont complémentaires et la logistique s'en trouve simplifiée.

Nous proposons de réaliser, durant l'été austral 1989-90, une campagne préparatoire légère de quelques jours, destinée à localiser avec précision le site d'implantation des mouillages. Lors de cette campagne, couvrant un réseau de 6 à 7 stations sur des fonds supérieurs à 2500 m, les paramètres suivants seront mesurés:

- bathymétrie afin de choisir une région peu accidentée, loin de tout relief risquant de créer courants et tourbillons et de favoriser la resuspension de sédiment.
- profils hydrologiques (température, salinité, oxygène dissous, sels nutritifs) permettant de définir:
  - la profondeur de la couche de mélange et de la couche euphotique.
  - les limites des différentes masses d'eaux ainsi que leur vitesse et direction de déplacement (avec un quadrillage de stations tel qu'indiqué sur la Fig. 8).
- profils de matériel particulaire, avec les concentrations des éléments majeurs ( $C_{org}$ ,  $C_{min}$ , Si, Al, Ca etc...) dans les particules fines prélevées à différentes immersions avec une pompe type POP. Cette étude permettra de définir la profondeur idéale de mouillage du piège profond, assez profonde pour intégrer un flux suffisant, assez éloignée du fond pour éviter les resuspensions.

Un réseau de 6 à 7 stations sur des fonds  $\leq 2500$  m devrait suffire pour définir le site de mouillage. Cette campagne de trois jours serait effectuée au cours d'une rotation du *Marion Dufresne* durant l'été austral 1989-90.

### **3 - Organisation du mouillage**

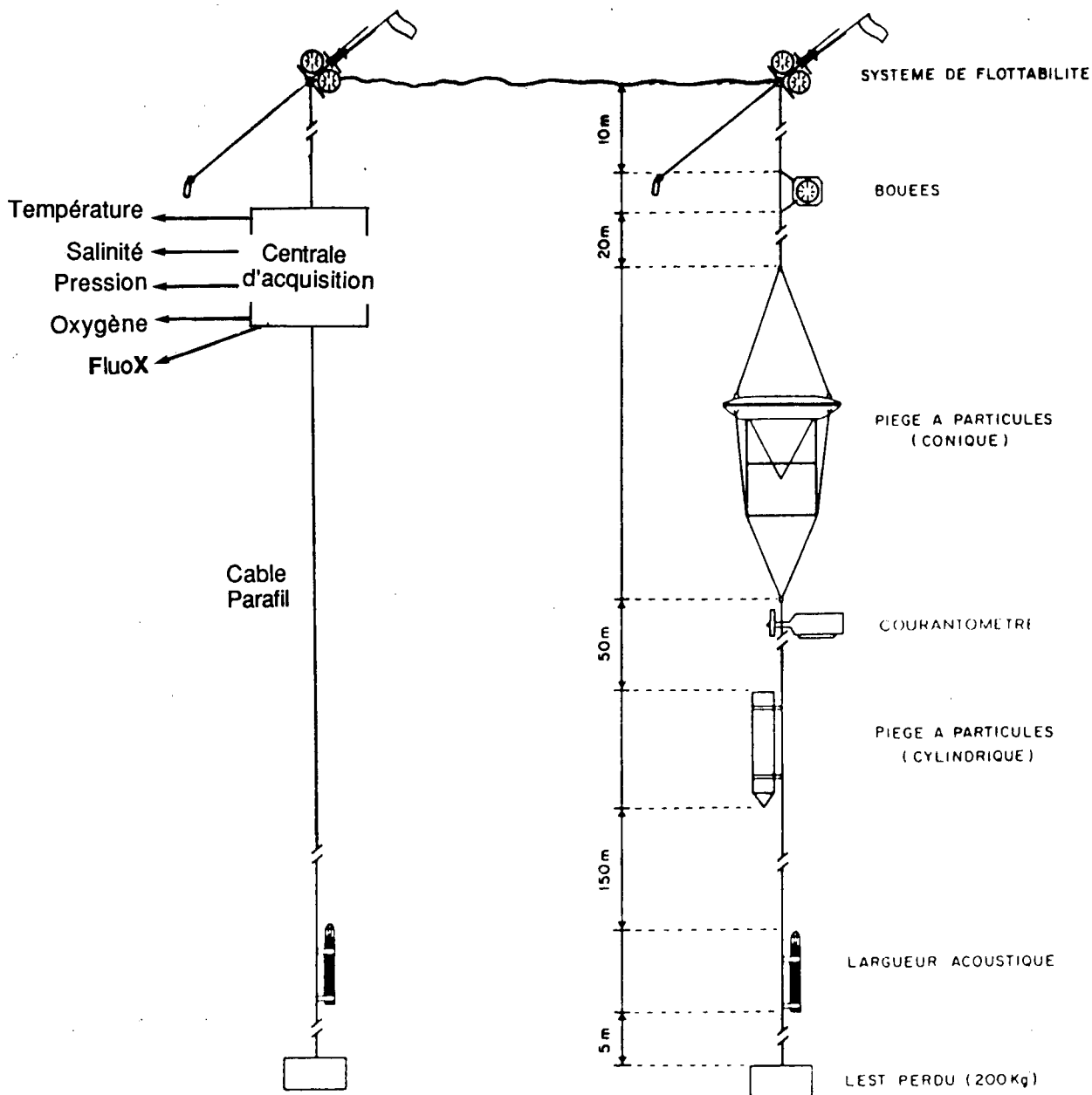
Deux trappes à sédiment seront mouillées à la verticale l'une de l'autre, d'une part sous la couche euphotique vers 200 m et, d'autre part, à la profondeur retenue à la suite de l'étude préliminaire (Fig. 9). Le type de piège conique Technicap, d'une surface de prélèvement de 1 m<sup>2</sup>, équipé d'une platine de 12 ou 24 godets est le plus approprié. Sa grande surface de piégeage garantit des quantités d'échantillon suffisantes et accroît la probabilité de récolte des foraminifères indispensables pour les applications paléo-océanographiques. Sa grande autonomie permet de le laisser en place de trois à six mois, en fonction des besoins des programmes et des contraintes logistiques. Chaque trappe à sédiment sera équipée d'un courantomètre: la direction et l'intensité du courant dans la zone échantillonnée constituant deux mesures indispensables à l'interprétation de ces données.

Pour l'étude géochimique de la couche de surface et une bonne validation du modèle "couche mélangée océanique", des mesures régulières de la température, de la pression, de la salinité et de l'oxygène dissous dans les 150 premiers mètres sont indispensables. Ces données permettent non seulement d'alimenter ce modèle mais aussi de comparer leurs résultats aux observations de terrain. L'installation de sondes permettant l'acquisition en continu de ces paramètres est prévue, sur un mouillage voisin avec un câble en parafil (Fig. 9) pour compléter les prélèvements d'eau qui seront effectués régulièrement dans cette zone.

### **4 - Paramètres mesurés**

#### **Sur les prélèvements solides (trappes)**

- poids de matière sèche.
- détermination des espèces de diatomées et de foraminifères. Mesure de la composition isotopique de l'oxygène et du carbone des espèces dominantes de foraminifères.



**Fig 9** Schéma de principe du mouillage double prévu pour Antarfix

Deux pièges sont prévus pour chaque mouillage:

- le premier situé à la base de la couche euphotique vers 150 m.
- le second dans la couche profonde, assez près du fond pour intégrer le flux de la colonne d'eau et assez éloigné du sédiment pour éviter sa resuspension .

- traceurs mesurés sur les échantillons prélevés aux deux profondeurs: Al (alumino-silicates), Ca ( $\text{CaCO}_3$ ),  $C_{\text{org}}$  et  $C_{\text{min}}$ , N, P, Si et silice biogénique (activité biologique); la composition minéralogique, non destructive, pourra être envisagée. La mesure du  $^{228}\text{Th}$ , d'une période de deux ans, permettra d'estimer des flux de productivité primaire à l'aide de modèles basés sur les déséquilibres radioactifs. Les concentrations en  $^{210}\text{Pb}$  sur ce matériel permettront d'évaluer les temps de résidence des éléments par rapport au processus de soustraction par les particules. Les mesures des isotopes du thorium et du néodyme devraient contribuer à la compréhension des échanges dissous - particulaire. Cependant, l'étude de ces traceurs ainsi que de ceux de l'état d'oxydation du matériel piégé tels que Mn, Fe, Cr ou de métaux traces applicables à la paléo-océanographie (Cd) sera plus délicate en raison des risques de désorption entre la fraction solide et l'eau surnageante, à l'intérieur du godet. Sur les échantillons recueillis par la trappe "profonde", on s'attachera à mesurer les mêmes éléments pour suivre leur évolution verticale; en outre, on distinguera les fractions labiles et réfractaires des particules.

#### **Sur les prélèvements d'eau surnageante des godets**

- chlorophylle *a* et pigments végétaux (chromatographie liquide haute-pression), par classe de taille et uniquement dans les godets du piège supérieur, pour tracer la qualité du matériel phytoplanctonique prélevé.
- activité enzymatique permettant d'estimer la dégradation de la matière organique et l'efficacité du poison inhibant l'activité bactérienne ( *a priori* le formol, efficace sur de très longues périodes).

#### **Sur les prélèvements d'eau effectués de manière routinière**

Une périodicité bi-mensuelle pour la sortie du bateau serait idéale; elle est probablement irréaliste compte-tenu de la fréquence des vents forts dans cette région. Pour une bonne utilisation du bateau, on couplera ces sorties avec celles nécessaires au programme Poisson - Lambert (T, S,  $\text{O}_2$ , alcalinité totale, pH,  $\text{pCO}_2$ ,  $\text{CO}_2$  total). Le bateau devra donc être équipé d'une rosette de douze bouteilles de huit litres, permettant:

- l'échantillonnage fin de la couche de surface de façon à établir les profils verticaux de température-salinité, d'oxygène dissous, d'isotopes stables, de quatre sels nutritifs, de chlorophylle et phéophytine *a* et à mesurer les concentrations en  $^{228}\text{Ra}$  pour valider le modèle de déséquilibre radioactif. Cet échantillonnage permettra, en outre, d'analyser les communautés phytoplanctoniques à l'aide de trois prélèvements dans la couche euphotique.
  - l'échantillonnage de la colonne d'eau (T, S,  $\text{O}_2$ , sels nutritifs et traces), pour valider les hypothèses de reminéralisation de matériel particulaire.
- En outre, le prélèvement de trente litres d'eau à 10 et 50 m permettra d'établir les courbes de photosynthèse-lumière du phytoplancton et de mesurer le taux de synthèse des protéines.
-

## Position de la communauté française Coopération internationale

La communauté française est bien préparée à mener Antares, car un certain nombre d'équipes possèdent d'excellentes connaissances sur le système océanique du sud de l'Océan Indien. Certaines ont même leur activité centrée, depuis plusieurs années, sur les problèmes antarctiques: production primaire (Arago, Banyuls), sels nutritifs et cycle de la silice (LCEM, Brest), éléments-traces et géochimie (CFR, Gif; GRGS, Toulouse). Mais il sera indispensable de s'ouvrir à des compétences nouvelles, que ce soit pour le suivi de la Station Permanente Antarfix (Tabl. 1) ou pour le programme des campagnes (Tabl. 2: équipes françaises. Tabl. 3: équipes étrangères), de façon à couvrir dans les meilleures conditions les domaines suivants:

- structure de taille du réseau trophique.
- phénomènes d'assimilation et de régénération de C, N, Si.
- géochimie, incluant la chimie du sédiment superficiel.
- rôle du macroplancton dans les flux verticaux.
- biologie benthique.
- dynamique des masses d'eau, indispensable pour la modélisation.

**Tabl. 1** Equipes de recherche du programme Antarfix

Equipes	Paramètres suivis
Laboratoire Arago (Banyuls) G. Jacques	Biomasse et production primaire
Chimie Ecosystèmes Marins (Brest) P. Tréguer	Flux de silice Silice biogénique Sels nutritifs
Centre des Faibles Radioactivités (Gif) P. Buat-Ménard L. Labeyrie	Flux particulaire (éléments majeurs, traces, éléments radioactifs) Paléo-océanographie (isotopes)
GRGS (Toulouse) C. Jeandel, F. Grousset, J.-F. Minster	Isotopes (Nd) et concentrations (Nd, métaux) phases dissoute et particulaire Modélisation

La réalisation du programme implique le recrutement de deux ou trois Volontaires de l'Aide Technique pour assurer prélèvements et mesures *in situ*, conditionnement des échantillons, analyses chimiques (sels nutritifs) et biologiques (pigments). La mise en place de la station nécessitera la présence, en campagne d'été, de deux ou trois personnels.

A chaque rotation du *Marion Dufresne* auxquelles des manoeuvres de pièges seront prévues, une personne spécialisée sera embarquée. En métropole, la répartition des analyses se réalisera entre les quatre laboratoires impliqués dans Antarfix ainsi que l'AIEA et LPCM pour des analyses spécifiques.

Afin de bénéficier de la compétence des physiciens en modélisation de la circulation, Antares s'appuiera sur WOCE profitant de sa simultanéité avec Antares. Le programme WOCE-France est consacré au courant circumpolaire antarctique avec:

- 2 sections hydrologiques méridiennes de Madagascar au continent antarctique.

- une surveillance de la région Kerguelen - Amsterdam: courantométrie, marégraphie, hydrologie.
- un suivi de surface par altimétrie et diffusiométrie satellitaires: topographie, dynamique, champ de vent.

D'autre part, pour WOCE, les chercheurs anglais développent un modèle du système antarctique (modèle FRAM) particulièrement adapté à l'étude des zones frontales où pourront être évalués la couche de mélange, la diffusion verticale et le transport d'eau. Il ne sera pas possible d'accéder aux flux advectifs verticaux. Sur le terrain, les mesures se limiteront à l'hydrologie classique et au suivi de drogues.

**Tabl. 2 Equipes françaises de l'opération Antares**

Hydrologie classique (bathysonde)	LCEM / Arago
Circulation	LODYC
Modélisation	GRGS / LCEM / Arago
Données satellitaires	GRGS / LPCM/LODYC
Irradiation et bio-optique	LPCM
Echanges gazeux (CO <sub>2</sub> , DMS, aérosols)	LPCM / CFR
Transferts métaux atmosphère - océan	<b>CFR</b>
Sels nutritifs	LCEM / GRGS
Métaux-traces	GRGS / CFR / LCEM
Matière Organique Dissoute / Particulaire	LPCM / LCEM
Production primaire	GDR P4/ Arago
Production - turbulence	Arago
Structure de taille (dont cytofluorimétrie)	GDR P4/ Arago
Structure des communautés	Arago
Cycle de la silice	LCEM
Cycle de l'azote	COM
Métabolisme carboné	CFR / Arago
Biomarqueurs organiques	LPCM
Cartographie pigmentaire	Arago / COM
Géochimie isotopique	CFR / GRGS
Radionucléides	CFR / AIEA
Métabolisme et structure de taille zooplancton	Arago
Macroplancton et migrations	SZV
Activité microbienne	Arago / COM
Sédiments quaternaires	IGBA
Datation sédiments	CFR / LGE
Eaux interstitielles	LGE

AIEA	Agence Internationale pour l'Energie Atomique
Arago	Laboratoire Arago, Banyuls-sur-Mer.
CFR	Centre des Faibles Radioactivités, Gif-sur-Yvette.
COM	Centre d'Océanologie de Marseille.
GDR P4	Groupe de Recherche "Production Pélagique et Phénomènes Physiques"
IGBA	Institut de Géologie et de Biologie d'Aquitaine, Bordeaux.
LCEM	Laboratoire de Chimie des Ecosystèmes Marins, UBO, Brest.
LGE	Laboratoire de Géochimie des Eaux, Paris VII.
LODYC	Laboratoire d'Océanographie DYnamique et de Climatologie, Paris VI.
LPCM	Laboratoire de Physique et Chimie Marines, CEROV, Villefranche-sur-Mer.
GRGS	Groupe de Recherche en Géodésie Spatiale, Toulouse.
SZV	Station Zoologique de Villefranche, CEROV, Villefranche-sur-Mer.

Même si un certain recouvrement des deux opérations majeures (Eumeli et Antares) du "Programme Flux Océaniques" apparaît, la communauté est assez large pour permettre la réalisation simultanée de certains aspects de ces deux opérations. C'est d'ailleurs une nécessité si l'on ne veut pas démobiliser les groupes actuellement en pointe sur les recherches antarctiques, Antares ne pouvant être différé trop longtemps.

Nous ne détaillerons pas les techniques à mettre en oeuvre, demandant au lecteur de se reporter au document Eumeli); une bonne part de qui y est dit, aussi bien à propos de l'adéquation techniques-problèmes propres à PFO, qu'à propos des améliorations récentes s'applique à Antares. Notons seulement que l'état habituel de la mer dans l'Océan Austral rend encore plus nécessaire un test préalable, à la Station Permanente Antarfix, de la tenue des mouillages et de la signification de ce que récoltent les pièges à sédiments.

**Tabl. 3      Equipes étrangères du programme    Antares**

Production - turbulence	T. Platt (Bedford, Canada) El-Sayed (Texas A & M University, USA)
Modélisation production primaire	G. Billen et C. Lancelot (ULB, Belgique) F. Bianchi (CNR, Italie)
Structure du phytoplancton	M. Estrada (CSIC, Espagne)
Microbiologie	S. Mathot et C. Lancelot (ULB, Belgique)
Cycle de l'azote	L. Goeyens, F. Dehairs (ULB, Belgique) R. Martinez (CEAB, Espagne)
Cycle de la silice	D. M. Nelson et L. I. Gordon (OSU, USA) A. Kamatani (TFU, Japon) A. J. Van Bennekom (NIOZ, Pays-Bas)
Sédiment/Datation	D. deMaster (NCU, USA)
Matière organique dissoute	Y. Suzuki (MRI, Japan)



# Stratégie et calendrier

Rappelons que les opérations Antares se dérouleront essentiellement dans le secteur indien à l'ouest de Kerguelen sur trois systèmes différents:

- Zone Frontale Convergence Sub Tropicale - Front Polaire ( **système 1** )
- Eaux antarctiques du large influencées par la Divergence et ses tourbillons ( **système 2** )
- Zone Marginale de la Glace ( **système 3** )

## Phase préparatoire

1988-89

⇒ ⇒ **Participation au programme européen EPOS à bord du *Polarstern* (Arago, LCEM) Systèmes 1, 2 et 3**

Contribution française à l'étude du métabolisme du carbone et de la silice et à celle concernant la structure de taille du réseau trophique dans les trois systèmes, la zone frontale étant représentée, dans ce cas, par le Front Weddell-Scotia). Cette action est importante à maints égards:

- 1) par son caractère exemplaire puisqu'il s'agit de la première opération du Réseau Polaire Européen de la Fondation Européenne de la Science.
- 2) parce qu'elle intègre les équipes françaises dans un programme pluridisciplinaire dont les dominantes sont proches du futur Antares (chimie, microbiologie, production primaire, zooplancton et micronecton).
- 3) parce qu'elle permet de coopérer avec des équipes qui, ultérieurement, participeront à Antares.
- 4) parce qu'elle donne accès à du matériel collecté dans des trappes à sédiment dérivantes, ce qui prépare à une action autonome ultérieure.

**Tabl. 4 Calendrier des campagnes et opérations à la mer durant Antares**

	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	
<i>Etude des différents systèmes de l'Océan Austral</i>										
Campagnes	EPOS			Ant 1	Ant 2	Ant 3	Ant 4	Ant 5	Ant 6	Ant 7
Période	↔			↔ ↑	↔	↔	↔	↔	↔	↔
Système	1, 2, 3			1 2	2	2 et 3	1		2 et 3	1
Mouillage (M) - Relevé (R) de pièges										
Au cours campagne Antares					M1	R2-M3	R4-M5			R6
Campagne spécifique						R1-M2	R3-M4	R5-M6		
Période					↓	↑↓ ↑↓	↑↓ ↑↓	↑↓		↑
Système					2	2 1	1 1	1		
<i>Station permanente au large de Kerguelen</i>										
Campagnes			Antarfix 1	Antarfix 2						
Période			↑	↑						
Mouillage					←—————→ Campagnes de "La Curieuse" pour monitoring du site					
	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	

## 1990

- ⇒⇒ **Antarfix 1. Reconnaissance du site de la station permanente au large de Kerguelen**  
**Système 2**
- ⇒⇒ **Symposium International "Biogéochimie de l'Océan Austral"**  
Brest, juin ou juillet
- ⇒⇒ **Symposium EPOS**  
Bremerhaven, septembre

## Phase principale

(calendrier des opérations à la mer Tabl. 4)

## 1991

- ⇒⇒ **Antarfix 2. Mise en place de la station permanente avec trappes à sédiments**  
**Système 2**
- ⇒⇒ **Antarfix . Suivi continu de la station fixe de 1991 à 1995 durant la phase principale de l'ensemble du programme Antares.**  
**Système 2**
- ⇒⇒ **Antares 1 *Marion Dufresne* au printemps (novembre ou décembre 91)**  
**Flux de C, N et Si dans le système frontal Convergence Sub Tropicale - Front Polaire**  
(le long du 60 °E , de 43 à 51°S)  
**Système 1**  
Cette campagne aura pour objectifs de:
  - recueillir les premières données sur le fonctionnement du système frontal en régime printanier: production-régénération, réseau trophique.
  - étudier les mécanismes de contrôle des flux de matières dans la couche euphotique: turbulence, facteurs limitants chimiques et physiques, broutage.
  - mesurer les flux à l'interface eau-sédiment dans une zone réputée productive.
  - développer un programme léger d'océanographie physique: hydrologie, drogues en sub-surface. Cette action prépare les campagnes Antares 4 à 7.

## 1992

- ⇒⇒ **Antares 2 *Marion Dufresne* en été (janvier ou février).**  
**Campagne légère de reconnaissance du site "Tourbillon" au sud des Kerguelen.**  
**Système 2**  
Paramètres mesurés par analyse multiparamétrique continu de surface: T, S, fluorescence, deux sels nutritifs.  
Quatre personnes à bord (1 LCEM, 1 Arago , 2 Volontaires Aide Technique).
- ⇒⇒ **Antares 3 *Marion Dufresne* au printemps (novembre ou décembre)**  
**Flux comparés de C, N, Si dans les eaux antarctiques du large et dans celles des formations tourbillonnaires à méso-échelle liées au Plateau des Kerguelen**  
(zone 50-65°S 70-90°E).  
**Système 2**  
Etude centrée sur les processus contrôlant les flux dans la couche euphotique
- ⇒⇒ **Mouillages M1**  
**Système 2** (Plateau des Kerguelen): un mouillage à l'ouest de la zone tourbillonnaire (sur 55°S, 66°30 E), un mouillage sur fonds de 2000 m et un sur fonds de 4000 m sur le Plateau des Kerguelen.  
Le mouillage de M1 sera effectué durant la campagne Antares 3.

### 1993

- ⇒⇒ **Campagne spécifique relevé M 1 - mouillage M 2 *Marion Dufresne* en juin.**  
**Systeme 2**
- ⇒⇒ **Antares 4 *Marion Dufresne* printemps (novembre ou décembre).**  
**Flux comparés dans la zone antarctique du large et dans la zone du retrait de la banquise.**  
**Zone: 58-68°S 65-83°E.**  
**Systemes 2 et 3**  
Cette campagne a pour but de tester la validité des hypothèses sur les mécanismes qui contrôlent les flux de matière dans la zone marginale de la glace; compte-tenu des possibilités du *Marion Dufresne*, la campagne se déroulera dans le sillage de la banquise (50 miles au nord de la banquise).
- ⇒⇒ **Mouillages. Récupération M 2. Mouillage M 3**  
**Systeme 1**  
Ces opérations seront réalisées durant Antares 4.  
Mouillage de trois unités: une au nord, une au sud et une au coeur de la zone frontale (à 200 m, 1000 m au-dessus du fond, fond). Cette opération de mouillage avec relevé chaque six mois sera répétée dans les mêmes sites en 1994 et 1995.

### 1994

- ⇒⇒ **Campagne spécifique relevé M 3 - mouillage M 4 *Marion Dufresne* en juin.**  
**Systeme 1**
- ⇒⇒ **Antares 5 *Marion Dufresne* au printemps (novembre ou décembre).**  
**Etude des flux de matières dans la zone frontale.**  
**Systeme 1**  
Zone de travail de WOCE-France. Etude complète pelagos et benthos.
- ⇒⇒ **Mouillages. Récupération de M 4. Mouillage M 5**  
**Systeme 1**  
Ces opérations seront réalisées durant Antares 5.

### 1995

- ⇒⇒ **Antares 6 *Marion Dufresne* en été (février).**  
**Systemes 2 et 3**  
Objectifs et zones identiques à Antares 4.
- ⇒⇒ **Campagne spécifique relevé M 5 - mouillage M 6 *Marion Dufresne* en juin.**  
**Systeme 1**

### 1996

- ⇒⇒ **Antares 7 *Marion Dufresne* en été (janvier-février).**  
**Systeme 1**  
Objectifs et zones identiques à Antares 5.
- ⇒⇒ **Mouillages. Récupération M 6**  
Ces opérations seront réalisées durant Antares 7.
- ⇒⇒ **Symposium final sur Antares à Banyuls (automne).**